

Cu₅₄Ni₆Zr₂₂Ti₁₈ 벌크비정질 합금의 Nd:YAG laser 용접특성

Characterization of the Nd:YAG laser Welded Cu₅₄Ni₆Zr₂₂Ti₁₈ Bulk Metallic Glass Weld

한국생산기술연구원 벌크비정질나노소재사업단 김중현, 신승용, 배정찬
한국생산기술연구원 생산기반기술본부 변철웅
한국기계연구원 레이저응용시스템그룹 이재훈
한양대학교 신소재공학부 이창희

I. 서론

구조소재 연구분야에서는 비정질 소재나 준결정 소재와 같은 비평형 소재의 우수한 특성을 공학적으로 응용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1,2)} 특히, 벌크 비정질 (bulk metallic glass) 소재는 용융 액상금속의 응고시 glass 천이가 발생하는 임계 냉각속도 (critical cooling rate) 가 크게 감소되어 기존의 비정질 소재가 가지는 크기 제한성을 극복할 수 있다. 실제로, 벌크 비정질 소재의 비정질 형성능 (GFA: glass forming ability) 이 수십 mm 로 일반적인 주조공정에서도 균일한 비정질상을 가지는 중간재 제조가 가능하다. 새로운 소재의 개발이 실질적인 산업적용에 연계되기 위해서는 다양한 집합공정에 대한 연구가 요구된다. 구조물이나 기기 부품 등에 사용되는 구조소재의 집합에는 주로 용접 [welding] 공정이 적용되고 있다. 용접공정은 열원의 종류에 따라서 크게 가스용접, 아크용접 및 고밀도 에너지 용접기술로 구분할 수 있고, 열원에 따라서 용접과정에서의 열 사이클과 소재의 상변화, 잔류응력 및 용접부 기계적 특성이 상이한 결과를 나타낸다.

벌크 비정질 소재는 매우 높은 비강도 (specific strength)와 우수한 국부부식 저항성을 나타내나 저온에서의 취성이 매우 높아 취성파괴 (brittle failure) 의 단점을 가지고 있다. 이러한 취성파괴 거동은 결정화 (crystallization) 를 제어하지 못하는 경우에 취성이 더욱 높아진다. 용접부(weld) 에서 발생할 수 있는 비정질 상에서 결정상으로의 비가역적 상전이 (irreversible phase transformation) 는 용접 열 사이클의 관점에서 이해할 필요가 있다. 국부적인 열 유입에 따라 열원으로부터의 수직거리에 따라서 다양한 열 사이클이 존재하게 되고, 이 열사이클에 따라서 용접부는 크게 용착금속 (weld metal) 과 열 영향부 (heat affected zone) 로 구분된다. 용착금속은 피크 온도가 소재의 용접이상으로 고상에서 액상으로의 상전이가 발생하며 냉각과정에서 재응고가 발생한 영역이다. 벌크 비정질 용착금속에서의 상조성은 궁극적으로 냉각속도, 피크온도 및 기화 등에 따른 화학조성 변화에 의존한다. 반면에, 열 영향부는 용접 이하의 피크온도를 보이는 영역에서 고상 상변화 및 미세조직의 변화가 유발됨으로써 국부영역에서의 소재특성의 변화가 발생하는 영역을 말하며, 벌크 비정질의 경우 고상 결정화 거동이나 열처리에 따른 비정질구조적 변화 등이 열 영향부 형성의 주요 요인이 될 수 있다.

이전 연구에서는 다양한 아크 전류, 아크 전압 및 아크 이송속도의 조합을 통해 입열량에 따른 가스 텅스텐 아크용접 (GTAW) 용접부의 용접특성을 결정화 거동의 관점에서 살펴본 결과 열 영향부에서의 결정화에 따라 용접부의 취성이 매우 높아지는 것을 확인하였다.³⁾ 결론적으로, 벌크 비정질 용접부의 건전성을 높이기 위해서는 결정화를 제어할 수 있는 용접공정의 개발이 필요하다. 이를 위

해서 본 연구에서는 절대 입열량이 낮으나 매우 국부적인 영역에서의 열 유입이 가능한 고밀도 에너지 지원인 레이저를 이용하였다. 사용된 레이저는 Nd-YAG 레이저로 입열량과 열 사이클의 변화를 유도하기 위해서 펄스화된 레이저광의 펄스 형상과 이송속도를 변화시키면서 벌크 비정질 용접부의 결정화 거동과 용접부 특성을 관찰하였다.

II. 실험방법

본 실험에 사용한 벌크비정질 조성은 $Cu_{54}Ni_{16}Zr_{22}Ti_{18}$ 로서 비정질 형성능 6mm를 가지고 있다⁴⁾ 각 원소의 순도 99.99%의 원소재를 사용하여 아르곤 분위기에서 용해, 합금화한 후 roll casting으로 판재를 제작하고 30 mm × 30 mm × 1mm의 판재로 기계적 가공을 하여 실험에 사용하였다. Fig 1에 $Cu_{54}Ni_{16}Zr_{22}Ti_{18}$ 조성의 비정질의 리본과 판재의 특성을 나타내었다. XRD 및 DSC 분석 결과 리본과 유사한 결과로 비정질임을 확인하였다.

비정질로 제작된 판재를 Nd YAG 레이저 용접 (Lumonucs, JK704)을 bead on plate로 수행하였다. 비정질 판재에 다양한 펄스 형태 레이저광의 single 펄스를 주사한 후 비정질 판재에 형성된 비드 형상 및 결정화를 분석하였으며, single 펄스의 최적화 조건에서 비정질의 이송속도(travel speed)를 20, 40, 60 mm/min 으로 변화시켜 비정질의 용접특성을 조사하였다. Table 1에 각 공정변수를 나타내었다.

용접부는 일부분을 절단하여 공정조건에 따른 비드 폭, 용입깊이, 열영향부의 결정화 및 균열 등을 조사하였다. 미세조직 관찰을 위하여 1 μm 다이아몬드 까지 경면화 처리를 실시한 후 SEM (scanning electron microscope)로 관찰하였으며 용접후 용접부의 결정상 생성여부를 확인하기 위하여 micro area XRD를 이용하여 용착금속, 열영향부 및 모재를 분석하였다. 또한 용접부의 기계적 특성을 조사하기 위하여 비커스 경도와 인장강도를 측정하였다.

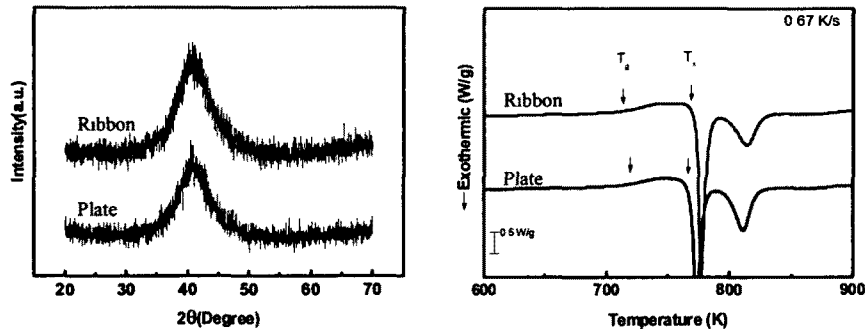


Fig 1 Results of XRD and DSC

Table 1 Nd YAG laser welding parameters

Welding mode	Parameter	Conditions	Beam position
Laser single spot	Peak power	0.5, 1.0, 1.5, 2.0 kW	0 mm
	Pulse width	1, 4, 7, 10 ms	
Laser scanning	peak power	1.0 kW	
	Pulse width	4 ms	
	Frequency	2 Hz	
	Travel speed	20, 40, 60 mm/min	

III. 결과 및 고찰

Fig 2 에 도식에서 나타낸 바와 같이 불연속 펄스 레이저를 주사하는 경우 용접부의 형성은 개별적 비드 (single spot bead) 의 연속적인 overlapping 의 과정을 통해서 형성되며 각 spot bead의 펄스에 따른 거동과 overlapping 과정에서의 반복적 열 사이클 및 광원의 이송속도에 spot 간 거리에 따라서 전체 용접부의 형상과 상조성 및 기계적특성이 달라진다 따라서, 1회 펄스 레이저의 주사에 따른 single spot bead 의 상조성에 미치는 펄스 형상의 영향과 광원의 이송속도에 따른 용접부의 상조성을 관찰하였다

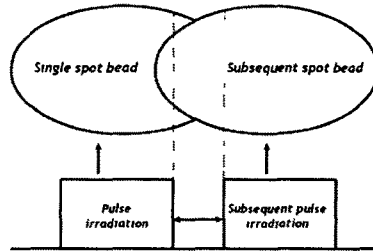


Fig 2 Schematic illustration of the bead formation by Nd YAG pulsed laser

1. Single spot 결과

Fig 3에 Nd YAG 레이저 single pulse 주사후 펄스 에너지에 따른 비정질의 결정화에 대하여 나타내었다 Peak power가 0.5 kW 인 경우 모든 조건하에서 용입이 충분이 이루어지지 않았으며 펄스 폭이 1 ms 인 경우 peak power 10 kW 이상에서는 킥 모드에 의한 용접부에 구멍이 발생하였다 펄스에너지가 4 J 이상에서 열영향부에 결정화가 발생하였으며 특히 펄스에너지 15 J 이상에서는 비정질 표면에 균열이 발생하였다

Fig 4에 펄스 형태에 따른 용접부 수평 방향의 미세조직을 나타내었다 펄스 형상이 peak power 15 kW, 펄스폭 10 ms 조건인 경우 비정질의 용접부를 크게 3가지로 용융이 일어난 용착금속, 결정화된 열영향부 및 모재로 구분되어진다 용착금속은 용융이 일어나고 비정질 합금의 TTT 곡선에서 결정화 노즈 보다 빠른 속도로 냉각이 되어 결정이 발생하지 않았다 그러나 열영향부는 비정질의 결정화 온도 이상 올라간 후 냉각 속도의 저하로 결정상이 생성되었다고 판단되어진다 모재의 경우는 온도 분포가 비정질의 결정화 온도 이하여서 결정이 발생하지 않고 비정질을 유지하고 있다. 결정화된 열영향부내의 결정 크기는 용착금속 근처 에는 약 5 μm 정도의 크기를 가지고 있으며 거리가 멀어짐에 따라 결정의 크기가 감소하는 경향을 나타내었다 이는 레이저 용접시 용접부의 온도 분포에 의한 영향으로 용융선에 가까울수록 온도가 높아 결정상의 성장을 초래 하며 거리가 멀어질수록 결정의 크기는 감소하고 결정의 수는 증가한다. 또한 결정화된 열영향부에서 균열이 발생한 것을 관찰할 수 있었다 이는 비정질이 레이저 광원에 의해 결정화가 진행되어지면 일반적으로 부피가 감소하여 비정질과 결정상의 계면에 응력이 발생한다 이러한 열응력에 의해서 균열이 발생하였다고 판단된다

그러나 peak power 1.0 kW, 펄스 폭 4 ms인 경우는 용착금속, 열영향부 및 모재에서도 결정이 생성되지 않은 것을 확인하였다

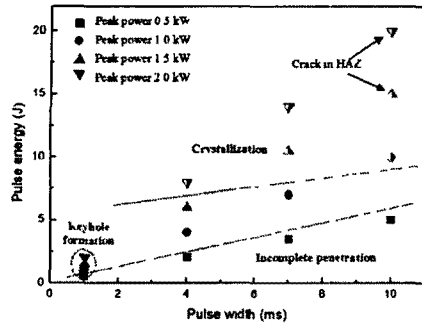


Fig 3 Weld width as a function of acceptable pulse width

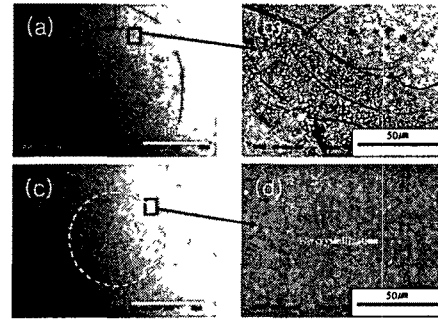


Fig 4 Microstructures of the laser welded BMG [(a),(b) pulse energy of 15 J, (c),(d) pulse energy 4 J]

2. Laser scanning 결과

실제로 1회 펄스 주사에 따른 single spot 비드의 용접부 상조성의 거동이 실제 용접비드의 상조성과 일치된 결과를 얻지는 않을 것이다. 왜냐하면, 반복적 펄스 레이저주사시 이전 펄스에 따른 각 부위의 열 사이클이 충분히 냉각되지 않은 상태에서 다음 펄스의 주사가 이루어 지므로 이전 펄스 주사시의 열 사이클과 다소 상이한 열 사이클을 예상할 수 있기 때문이다 이를 확인하기 위해서, single spot 결과 결정화 되지 않은 펄스 형태 중 열영향부를 최소로 할 것으로 예상되어지는 조건 peak power 10 kW, 펄스 폭 4 ms 의 조건으로 비정질의 이송속도에 따른 레이저 용접부 특성을 조사하였다 Frequency 는 2 Hz 로 고정하여 실험을 하여 결과를 Fig 5 에 나타내었다 비정질의 이송속도가 20, 40, 60 mm/min 증가함에 따라 비드의 간격 역시 약 0.16, 0.32 및 0.48 mm 로 증가하여 overlapping 되어지는 부분이 이송속도가 증가할수록 감소하였다 용접된 시편의 수직방향으로 연마하여 미세조직의 결과를 보면 이송속도가 20 mm/min 일때 열영향부에 밴드형태로 결정화가 발생하였으며 40 mm/min 에서는 결정화된 부분이 감소하였다 이송속도를 60 mm/min으로 증가하였을 때에는 결정화가 발생하지 않은 양호한 용접부를 얻을 수 있었다 이러한 열영향부의 결정화를 micro area XRD를 이용하여 확인하였다. 이러한 결과는 고상상태의 결정화는 TTT 곡선에서 용융점 이하, 결정화 온도 이상에서 노출되어지는 시간에 영향을 받는 것으로 single pulse 주사시 결정화 온도 이상에서 노출되어지는 시간이 짧은 반면 연속적으로 레이저를 주사하면 레이저가 주사된 후 비정질의 온도가 냉각되어지는 동안 다음의 레이저가 주사 되어 냉각속도를 저하시키고 결정화 온도 이상에서 노출되어지는 시간은 증가하여 결정화가 발생하였다고 판단된다 그러므로 비정질의 레이저 용접시 펄스의 형상도 결정화에 영향을 미치나 이송속도의 영향이 매우 중요하다고 판단된다.

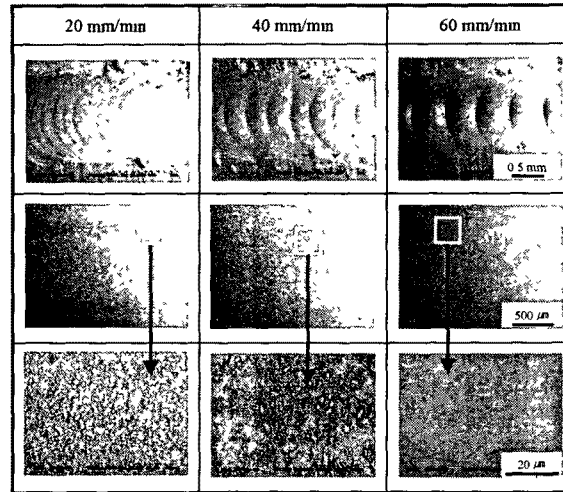


Fig 5 Plane-view morphologies of the bead surface and microstructure of the polished the HAZ of the $\text{Cu}_{54}\text{Ni}_{16}\text{Zr}_{22}\text{Ti}_{18}$ BMG plate scanned with pulse duration time of 4 ms, peak power of 1 kW and travel speed of 20, 40 and 60 mm/min at the frequency of 2 Hz

그림 6 에 peak power 10 kW, 펄스폭 40 ms 의 펄스형태로 이송속도 20, 60 mm/min의 용접된 시편의 인장시험 결과를 나타내었다 이송속도가 20 mm/min 인 경우 파단위치가 열영향부에서 파단이 이루어졌으며 최대인장강도는 513 MPa 를 나타내었다 파단면은 결정화가 발생하여 비정질의 전형적인 파단형태인 vein 을 보이지않고 있음을 확인하였다 그러나 이송속도 60 mm/min는 최대 인장강도 1723 MPa 로 모재의 압축강도 2100 MPa 보다 약 18 %가 적은 값을 나타내었다 그러나 파단위치가 용접부가 아닌 모재에서 발생하였으며 파단면 또한 vein 패턴을 보이고 있어 용접부는 결정화없는 양호한 용접부를 얻었다

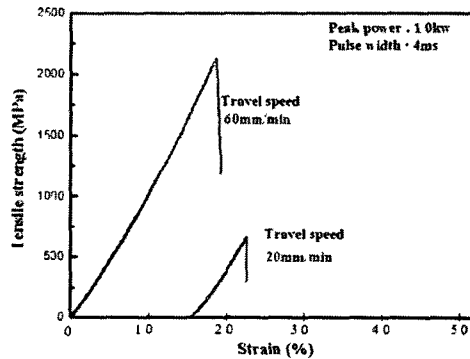


Fig 6 Tensile strength of the Nd YAG laser welded $\text{Cu}_{54}\text{Ni}_{16}\text{Zr}_{22}\text{Ti}_{18}$ bulk metallic glass

IV. 결론

Nd YAG 레이저를 이용하여 $\text{Cu}_{54}\text{Ni}_{16}\text{Zr}_{22}\text{Ti}_{18}$ 벌크비정질 용접 결과 아래와 같은 결론은 도출하였다

1 Single 펄스 레이저광 주사시 peak power 1-15 kW, 펄스폭 4-10 ms의 조건에서 비정질 용접부에 상변화가 발생하지 않았으나 펄스에너지 15 J 이상에서는 열영향부에서 상전이가 발생하고 균열이 발생하였다

2 Peak power 10 kW, 펄스폭 4 ms, frequency 2 Hz 의 조건으로 비정질 용접시 이송속도가 증가할 수록 열영향부의 결정화 정도는 감소하고 이송속도 60 mm/min 에서는 결정상 생성없이 양호한 용접부를 얻었다

3 Nd YAG 레이저를 이용하여 최대 인장강도 1723 MPa 의 우수한 접합강도를 나타내었다

V. 참고문헌

1 A Inoue Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys, Acta Mater 48, pp 279-306, (2000)

2 Akihisa Inoue, et al · Preparation of Bulk Glassy $\text{Pd}_{40}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{30}\text{P}_{20}$ Alloy of 40 mm in Diameter by Water Quenching, Mater Trans 37, pp 181-184 (1996)

3 J H Kim, et al Charaterization of the gas tungsten arc welded $\text{Cu}_{54}\text{Ni}_{16}\text{Zr}_{22}\text{Ti}_{18}$ bulk metallic glass weld, Mater Trans 46, (2005), accepted

4 S Y Shin et al New Cu-based bulk metallic glasses with high strength of 2000 MPa, Mater sci forum, 449-452, pp 945-948 (2004)